

# 磁流变阻尼器减振特性实验研究

张步云<sup>1</sup> 陈怀海<sup>1</sup> 贺旭东<sup>1</sup> 陈 岩<sup>2</sup> 姜 超<sup>2</sup> 郭家骅<sup>3</sup>

(1. 南京航空航天大学机械结构力学与控制国家重点实验室, 南京, 210016;  
2. 北京机电工程研究所, 北京, 100074; 3. 上海宇航系统工程研究所, 上海, 201108)

**摘要:**以铝制圆筒自由梁为研究对象,建立了磁流变阻尼器振动实验系统,研究了磁流变阻尼器对结构振动特性的影响以及磁流变阻尼器的减振特性。比较了在有无磁流变阻尼器和阻尼器控制电压不同的情况下结构的频响函数,分别以正弦信号和随机信号对梁进行激励,测试了梁在阻尼器不同工况条件下的振动响应。研究结果表明:仅在较窄的频段内,磁流变阻尼器能够改变梁的振动特性,降低频响函数的幅值;在结构振动的低频区,磁流变阻尼器减振效果明显,在高频区对结构的振动响应影响不大。

**关键词:**磁流变阻尼器;振动控制;振动试验

**中图分类号:** O328      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1005-2615(2012)06-0855-07

## Experimental Study on Damping Characteristic of Magneto-Rheological Damper

Zhang Buyun<sup>1</sup>, Chen Huaihai<sup>1</sup>, He Xudong<sup>1</sup>, Chen Yan<sup>2</sup>, Jiang Chao<sup>2</sup>, Guo Jiahua<sup>3</sup>

(1. State Key Laboratory of Mechanics and Control of Mechanical Structures, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing, 210016, China; 2. Beijing Electromechanical Engineering Institute, Beijing, 100074, China; 3. Aerospace System Engineering Shanghai, Shanghai, 201108, China)

**Abstract:** A vibration experimental system of a cylindric aluminium beam with magneto-rheological (MR) dampers is established. The influence of the MR damper on the structure vibration behaviour is studied, and the vibration reduction is researched. The frequency response functions of the beam with and without the MR dampers under different control voltage are compared. The beam is excited by sine signals and a random signal respectively and the responses are measured with the MR dampers working in different conditions. The research result shows that the MR damper changes the vibration characteristic of the beam only in a narrow frequency domain, and the vibration reduction performance of the MR damper is significant in the low frequency domain but not so effective in the high frequency domain.

**Key words:** magneto-rheological damper; vibration control; vibration test

航空航天等产品在地面试车时的边界条件与产品实际飞行时常有较大区别,因此其振动状态也有较大差异。试车时的振动量级常远大于飞行时的值,且振动特性也有较大差异。此时需对产品在试车时的振动进行必要的控制,提高地面试车与空中

飞行时的状态相似程度,从而提升产品试车的可靠性。在振动控制中常使用阻尼器对结构的振动响应进行抑制。阻尼器可分为常规的不可在线控制型和可在线控制型两类。由于产品在试车时的工况不断变化,因此需要采用可在线控制型的阻尼器对产品

响应进行在线调节。可在线控制型的阻尼器主要有电磁阻尼器<sup>[1-2]</sup>和磁流变(电流变)阻尼器。受原理性限制,电磁阻尼器常用于轴系的振动控制,而磁流变(电流变)阻尼器可用于一般结构的控制。相对电磁阻尼器而言,磁流变阻尼器的控制简单,所需的控制能量小,控制电压低,已成为研究和应用的热点。本文尝试采用磁流变阻尼器对结构振动进行控制,主要应用实验方法探讨磁流变阻尼器的减振特性。

近年来,磁流变阻尼器在振动工程中的应用得到越来越多研究者的重视。1948年,Rabinow<sup>[3]</sup>发现了磁流变现象,继而提出了磁流变液(Magneto-rheological fluid)的概念。磁流变液是一种特殊的智能材料,它是由微米级的高磁导率、低磁滞性的软磁性颗粒和非磁性液体混合而成的悬浮体<sup>[4-5]</sup>。在无磁场作用下磁流变液表现为低粘度的牛顿流体特性,在外加磁场作用下可以在毫秒级时间内变成一种类似半固体具有高粘度、低流动性的物质,并呈现宾汉流体特性<sup>[6]</sup>,且这种变化是可逆的。磁流变阻尼器(Magneto-rheological, MR)即为利用磁流变液在磁场中的特性产生阻尼力的半主动控制装置<sup>[7-10]</sup>。

在MR阻尼器的研究中,很多学者<sup>[11-14]</sup>将研究重心放在MR阻尼器力学模型的建立上。例如,Stanway等人<sup>[11]</sup>提出了Bingham模型,这是一种最简单、最常用的力学模型,由一个粘性阻尼器和库仑摩擦阻尼器组成,能有效地拟合阻尼力与位移之间的关系。Wen<sup>[12]</sup>提出了Bouc-Wen力学模型,这个模型由弹簧、粘性阻尼器和Bouc-Wen模型组成,解决了Bingham模型无法拟合力-速度特性的问题。这些都属于参数力学模型。还有些学者提出了非参数力学模型,如Dinh等人<sup>[15]</sup>提出的黑盒子模型和Metered等人<sup>[16]</sup>提出的神经网络模型等。迄今仍没有一个MR阻尼器的力学模型得到广泛的认可。因此,将现有的力学模型应用于实际工程并不能取得良好的效果。针对MR阻尼器的实际问题,有些学者也进行了理论研究和实验探索。Spencer等人<sup>[13,17]</sup>通过大量的试验研究,表明了MR阻尼器在减小结构地震响应中起到有效的作用。邬喆华<sup>[18]</sup>采用MR阻尼器对斜拉索振动的控制进行了试验和理论研究,系统地分析了MR阻尼器对斜拉索的减振效果。徐龙河等人<sup>[19-20]</sup>等基于现代最优控制理论提出半主动控制算法,研究了MR

阻尼器控制结构响应的特性,并分析了时间滞后与补偿对控制系统性能的影响。汪建晓等人<sup>[21]</sup>从理论和试验方面研究了MR阻尼器在振动控制中的应用。关新春、欧进萍<sup>[22]</sup>研究了修正的Bouc-Wen力学模型,为MR阻尼器在结构控制中的应用提供基础。就目前来看,绝大多数文献对MR阻尼器的研究多集中在阻尼器的参数识别和建模方面,对MR阻尼器在结构减振方面的实际研究较少见到。

本文针对一铝制圆筒自由梁,采用实验方法研究了一种MR阻尼器的减振特性。测试了梁在有无MR阻尼器时的振动特性,以及在不同激励作用下梁振动响应的变化。

1 实验系统

1.1 磁流变阻尼器工作原理

本文研究所用的MR阻尼器是美国LORD公司生产的RD-8040-1型MR阻尼器。它主要由缸筒、活塞、储能器、磁流变液和线圈组成,其实物图与示意图如图1所示。

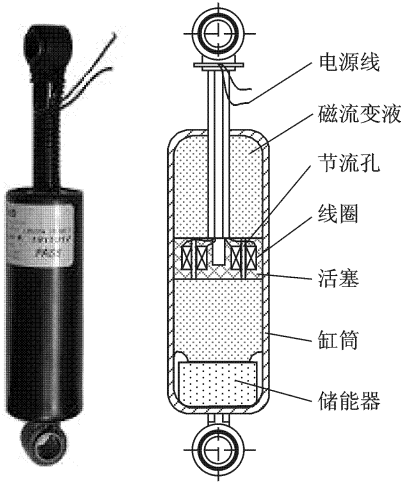


图1 RD-8040-1型MR阻尼器实物图与示意图

该MR阻尼器是磁流变液流动模式阻尼器,即磁流变液由于受到压力差通过节流孔产生流动。节流孔周围绕有线圈,线圈通电后周围产生磁场,节流孔内的磁流变液在磁场作用下黏度变大,流动性变差,从而阻尼力产生变化。线圈中电流强度的变化由外部提供的0~5 V直流电压控制。阻尼器缸筒底部为储能器,内置高压氮气。当无电流通入线圈时,活塞在外力作用下向下运动,此时氮气压力增加,对活塞产生一个反作用力使之平衡,起到保护阻尼器的作用。此MR阻尼器的技术参数如表1所示。

表 1 RD-8040-1 型 MR 阻尼器技术参数	
参数	数值
工作电流/A	0~2
输入控制电压/ $V_{DC}$	0~5
最大工作温度/ $^{\circ}C$	71
阻尼力(峰值)/N	$\geq 2\,447$
响应时间/ms	$<15$

1.2 阻尼减振实验系统

本实验系统的构型是按照实际应用对象搭建的,即两端自由的梁模型。实验采用的梁是一个铝制圆筒,梁长为1.6 m,横截面的外径为85 mm,内径为65 mm。两端采用橡皮绳悬挂,模拟梁的自由-自由状态。实验中采用2 个RD-8040-1 型MR 阻尼器,分别安装在梁的两端。本实验所采用的信号发送和采集设备是VTI 仪器的VXI 数字信号采集和发送系统,由EX2500A,VT1436 和VT1434A 三个集成板组成。传感器采用PCB 公司的333B32 型加速度传感器。由于MR 阻尼器内高压氮气的作用,自然状态时,MR 阻尼器的活塞处于行程的最上部。为了使MR 阻尼器的活塞处于行程的中部,分别在梁的两端和中间加上不同质量的配重,使阻尼器承受一定的压力。实验表明,单个阻尼器在承受约200 N 的压力时,活塞大致处于行程的中部。考虑到系统的平衡性以对激振器进行保护,将激振器安装在梁的中部,测量点布置在距梁左端407 mm 处。图2 即为自由梁MR 阻尼减振试验系统的原理图。

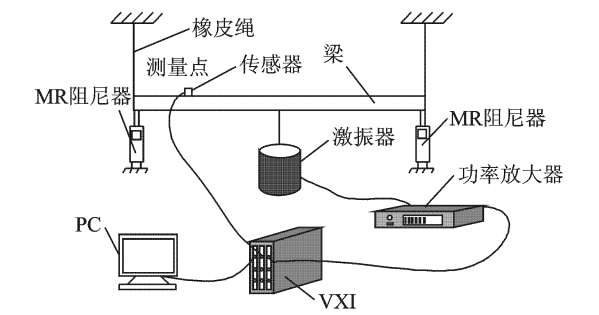


图 2 自由梁MR 阻尼减振试验系统

2 频响函数比较

2.1 有无阻尼器时梁的频响函数

使用VXI 发出一个随机激励信号,同时采集测量点的时域响应信号。利用 $H_1$  频响函数估计模型估计出梁结构的频响函数。在不改变激励信号的情况下,分别测量未安装MR 阻尼器和安装MR 阻尼器时的频响函数。

图3 对两种情况下频响函数进行了对比,从中可以看到梁系统振动特性的变化主要集中在低频区,在该区域振动幅度有一定程度下降,在高频区

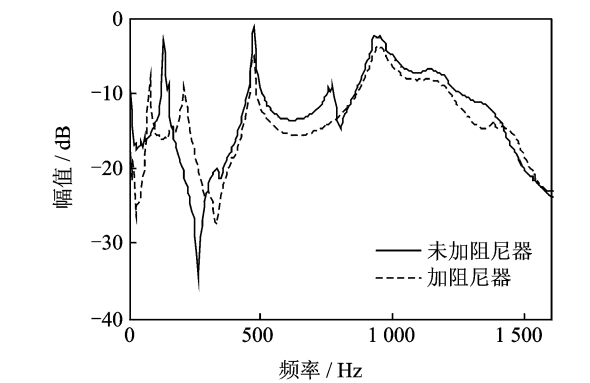


图 3 有无MR 阻尼器两种情况下频响函数

振动幅度无明显变化。

2.2 阻尼器不同控制电压时梁的频响函数

以下针对MR 阻尼器的可控性进行研究。由表1 知该MR 阻尼器的工作电流是0~2 A,在实验中阻尼器的工作电流是依靠输入的直流电压来控制。电压的调节范围为0~5 V。它们之间呈线性关系,故在实验前要对它们之间的关系进行测量拟合,以得到输入电压与工作电流之间准确的数学关系。图4 即为实测拟合曲线。

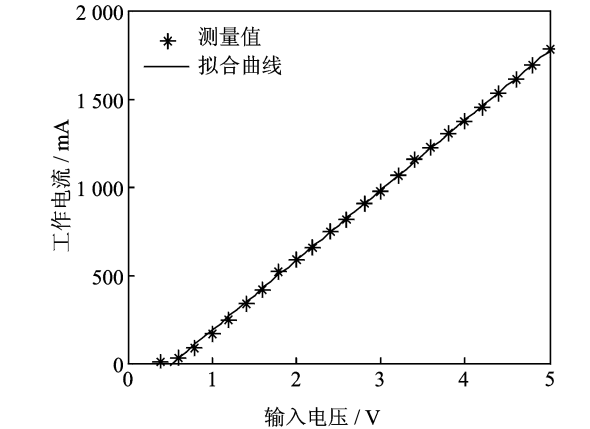


图 4 MR 阻尼器输入电压和工作电流拟合曲线

图5 显示的是梁在MR 阻尼器输入控制电压分别是0 V 和5 V 时200 Hz 范围内的频响函数。

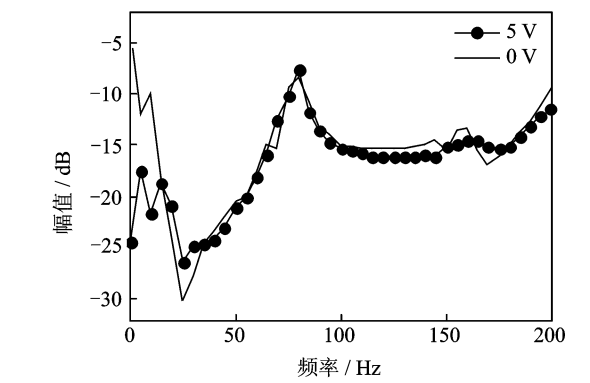


图 5 MR 阻尼器在不同输入控制电压下梁频响函数

从图 5 可以看出,增加控制电压后,MR 阻尼器仅在较窄的低频区( $<20\text{ Hz}$ )内对梁的频响函数幅度有降低作用。

3 正弦实验

为了验证 MR 阻尼器在梁结构振动响应中起到抑制作用,对梁结构进行不同频率的正弦激励,考察阻尼器的有效频率范围。试验过程中,分别记录  $0\text{ V}$  和  $5\text{ V}$  两种控制电压下测点处的时域响应。图 6~17 分别显示了不同频率下 MR 阻尼器的减振效果。图中实线为控制电压为  $0\text{ V}$  时的响应,虚线为控制电压为  $5\text{ V}$  时的响应。

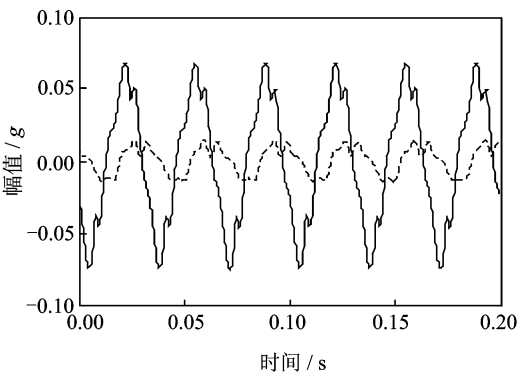


图 9 频率为 30 Hz 时响应比较

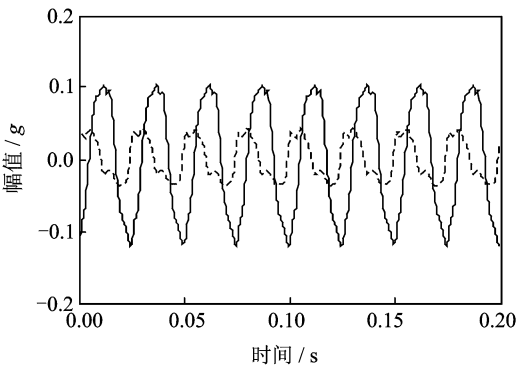


图 10 频率为 40 Hz 时响应比较

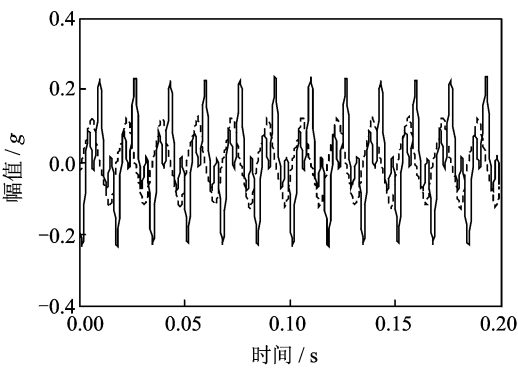


图 11 频率为 60 Hz 时响应比较

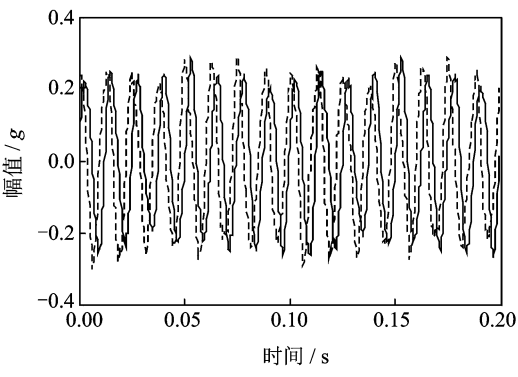


图 12 频率为 80 Hz 时响应比较

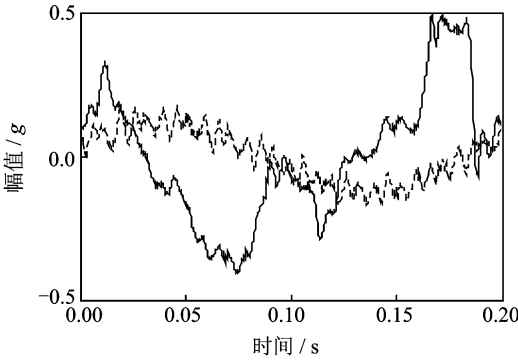


图 6 频率为 5 Hz 时响应比较

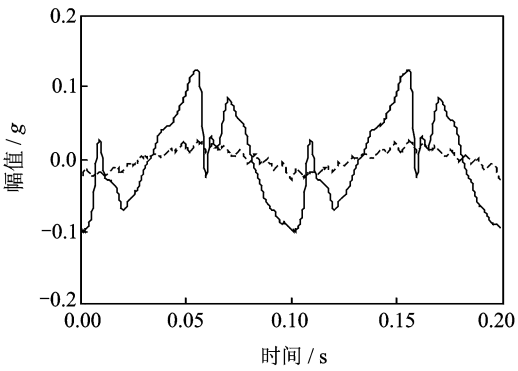


图 7 频率为 10 Hz 时响应比较

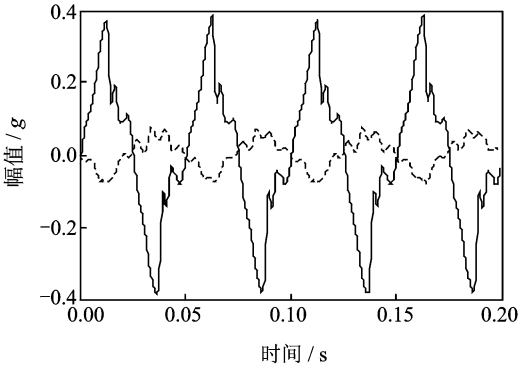


图 8 频率为 20 Hz 时响应比较

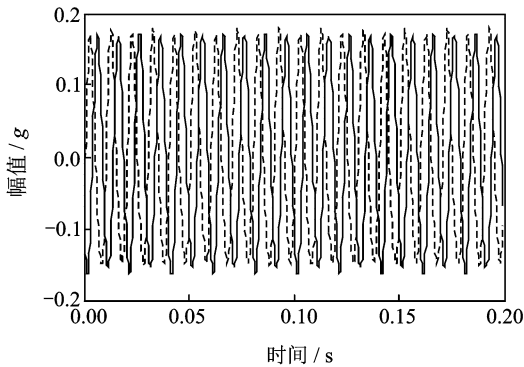


图 13 频率为 100 Hz 时响应比较

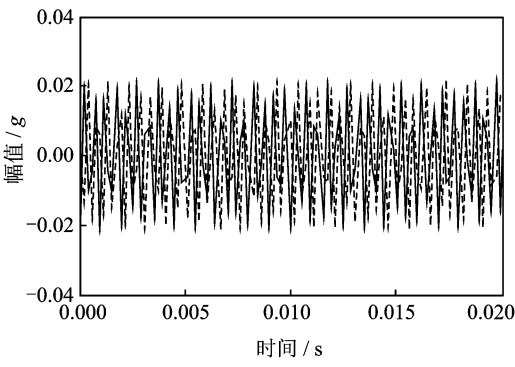


图 17 频率为 2 000 Hz 时响应比较

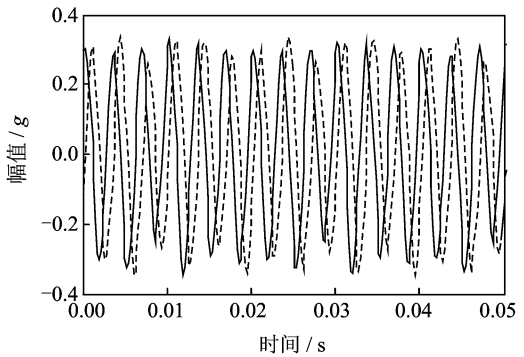


图 14 频率为 300 Hz 时响应比较

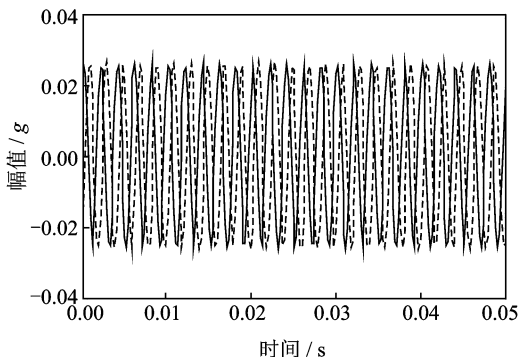


图 15 频率为 500 Hz 时响应比较

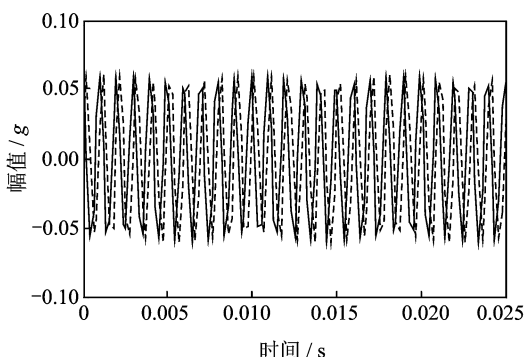


图 16 频率为 1 000 Hz 时响应比较

率为 10 Hz 时,通过增加 MR 阻尼器的控制电压使响应幅度下降了约 80%。但随着频率增大,MR 阻尼器的可控性对结构响应的影响并不明显。当激励频率大于 80 Hz 时,MR 阻尼器控制电压的改变基本上对梁的响应无影响。图 18 给出了该 MR 阻尼器控制电压为 5 V 时的响应总均方根值与控制电压为 0 V 时的响应总均方根的比值。从图中看出,仅在 80 Hz 之前,MR 阻尼器的可控性对减振具有作用。这说明 MR 阻尼器的可控性在仅低频区对结构的响应控制有效果。

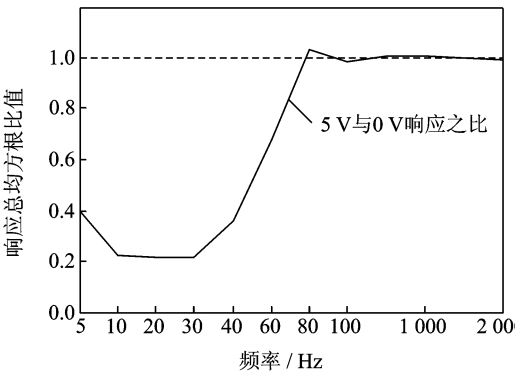


图 18 控制电压为 5 V 和 0 V 时响应总均方根值比

4 随机实验

采用图 19 所示的随机激励信号对梁进行激励,该激励形式来源于产品实测结果。

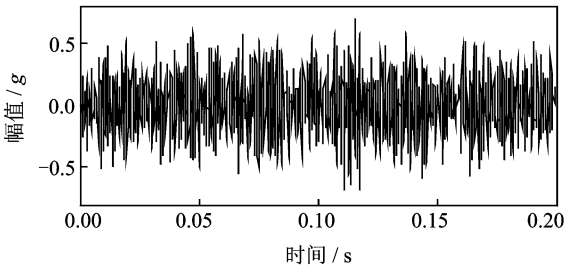


图 19 随机激励信号

从图 6~17 可以看出,当频率较小时,MR 阻尼器可控性对结构的响应影响比较大。如当激励频

在未装MR阻尼器时,测得测量点的时域信号,得到响应谱。原激励信号保持不变,在梁上安装MR阻尼器,再次测得梁在测点处的响应谱,如图20所示。

图20显示梁在装上MR阻尼器后,响应有了较大的变化。在235 Hz以下区域,振动的响应量级明显减小。而在高频段,振动的响应有大有小,这说明MR阻尼器在高频振动控制中不稳定,不能有效抑制高频振动。

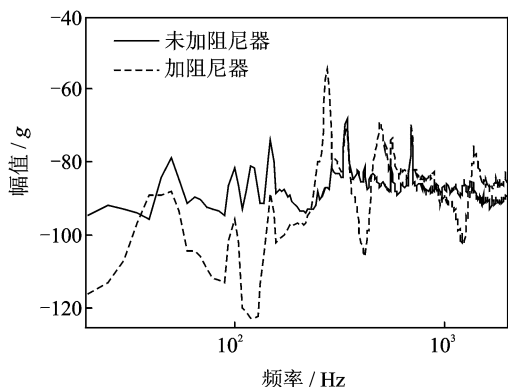


图20 加阻尼器与不加阻尼器响应谱比较

## 5 结束语

本文主要从实验方面研究了MR阻尼器的减振性能,完成了有无MR阻尼器下结构频响函数的测试和响应的对比分析。针对本实验系统,结果表明:(1)MR阻尼器对结构低频段的振动具有良好的抑制效果,对高频段振动的减振效果不明显;(2)MR阻尼器的可控性也主要可用在低频区域,在高频区MR阻尼器的可控性不能发挥作用。本文的研究结论是基于该实验系统得到的,如何将MR阻尼器的力学特性与系统特性结合,使系统在高频段也可发挥MR阻尼器的阻尼可调性特点而使高频响应也有所下降值得进一步研究。

### 参考文献:

[1] 周瑾,蔡永飞,徐龙祥.被动式电磁阻尼器对磁悬浮转子系统不平衡响应的影响[J].南京航空航天大学学报,2010,42(6):744-747.  
Zhou Jin, Cai Yongfei, Xu Longxiang. Unbalance responses of magnetic bearing rotor system with passive electromagnetic damper[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2010, 42 (6): 744-747.

[2] 王有林,刘景林.电磁阻尼器设计研究[J].西北工业大学学报,2006,24(3):358-361.

Wang Youlin, Liu Jinglin. Designing electromagnetic damper used in space rendezvous[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2006, 24 (3): 358-361.

[3] Rabinow J. Magnetic fluids clutch [J]. Technical News Bulletin of National Bureau of Standards, 1948, 32(4): 54-60.

[4] Margida A J, Weiss K D, Carlson J D. MR suspensions and associated technology [C]//Proceedings of the 5th International Conference on ER Fluids. Singapore: World Scientific, 1996: 544-550.

[5] Foister R T. Magnetorheological fluids: US, Patent 5667715 [P]. 1997.

[6] Dyke S J, Spencer B F, Sain M K, et al. Modeling and control of magnetorheological dampers for seismic response reduction [J]. Smart Mater Struct, 1996, 5(5): 565-575.

[7] Carlson J D, Weiss K D. A growing attraction to magnetic fluids [J]. Machine Design, 1994, 66(15): 61-66.

[8] Hong S R, Choi S B, Choi Y T, et al. Non-dimensional analysis and design of a magneto rheological damper [J]. Journal of Sound and Vibration, 2005, 288(4): 847-863.

[9] Spelta C, Previdi F, Savaresi S M, et al. Control of magnetorheological dampers for vibration in a washing machine [J]. Mechatronic, 2009, 19(3): 410-421.

[10] Milecki A. Investigation and control of magneto-rheological fluid dampers [J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2001, 41 (3): 379-391.

[11] Stanway R, Sproston J L, Stevens N G. Non-linear modelling of an electro-rheological vibration damper [J]. Journal of Electrostatic, 1987, 20(2): 167-184.

[12] Wen Y K. Method of random vibration of hysteretic system [J]. Engineering Mechanics Division, 1976, 102(2): 249-263.

[13] Spencer B F, Dyke M K, Sain J D, et al. Phenomenological model of a magnetorheological damper [J]. ASCE Journal of Engineering Mechanics, 1996, 123(3): 230-238.

[14] Choi S B, Lee S K. A hysteresis model for the field-dependent damping force of a magneto-rheological damper [J]. Journal of Sound and Vibration, 2001, 245(2): 375-383.

[15] Dinh Q T, Kyoung K A. Identification and application of black-box model for a self-sensing damping

system using a magneto-rheological fluid damper[J]. Sensors and Actuators A, 2010,161(1):305-321.

[16] Metered H, Bonello P, Oyadiji S O. The experimental identification of magnetorheological dampers and evaluation of their controllers[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2010,24(4):976-994.

[17] Carlson J D, Spencer B F. Magneto-rheological fluid dampers for semi-active seismic control [C]//Proceedings of the Third International Conference on Motion and Vibration Control. Chiba, Japan: [s. n. ], 1996,2:35-40.

[18] 邬喆华. 磁流变阻尼器对斜拉索振动控制的研究[D]. 杭州:浙江大学,2003.

[19] 徐龙河,周云,李献忠. 半主动磁流变阻尼控制方法的比较与分析[J]. 世界地震工程,2000,16(9):92-100.

Xu Longhe, Zhou Yun, Li Xianzhong. Comparison and analysis of semi-active magnetorheological damping control method[J]. World Information on Earthquake Engineering,2000,16(9):92-100.

[20] 徐龙河,周云,李献忠. MRFD 半主动控制系统的时滞与补偿[J]. 地震工程与工程振动,2001,21(3):127-131.

Xu Longhe, Zhou Yun, Li Xianzhong. Time-delay and compensation for MRFD semi-active control system [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration,2001,21(3):127-131.

[21] 汪建晓,孟光. 磁流变液阻尼器用于振动控制的理论及实验研究[J]. 振动与冲击,2001,20(2):39-45.

Wang Jianxiao, Meng Guang. Theoretical and experimental study on the vibration control by magneto-rheological fluid dampers[J]. Journal of Vibration and Shock,2001,20(2):39-45.

[22] 关新春,欧进萍. 磁流变耗能器的阻尼力模型及其参数确定[J]. 振动与冲击,2001,20(1):5-8.

Guan Xinchun, Ou Jinping. Magnetorheological damper's damping force model and the definition of its parameter[J]. Journal of Vibration and Shock, 2001,20(1):5-8.